

[研究助成 (A)]

材質同定・全天球透視検査に向けた カーボン・ゴム印刷式のビーチボール型カメラの創出

2251035

研究代表者
(助成金受領者)中央大学 理工学術院
電気電子情報通信工学科

助教 李 恒

[研究の目的]

上記の非破壊検査素子を創出するうえで、具体的には全天球視野 MMW-IR 撮像可能なボールカメラの動作実証が目標となる。つまり本研究では死角の無いボールカメラでの全天球視野において、ヒトの眼には不透明な観察物に対し、MMW-IR 撮像に特有な透視による表面・浅部・深部の非破壊な材質同定を実証する。これらに対し、既存の全天球カメラ分野では透視性の欠如が技術的課題に挙げられる。左記は、既存カメラの光学的動作域が可視光（ヒトと同様の視認性）に依存するためである。一方、透視性に富む MMW-IR 帯域では、網羅的な全天球視野を生むボール状のカメラ化が未完成であり、具体的に球状を幾何学的に構成するデバイスが創出されていない。一方では、報告者はこれまでにカーボンナノチューブ（CNT）型の大面積変形 MMW-IR 撮像シートを独自に確立し、本研究でのカメラ実装へ展開する（図 1）。

[研究の内容、成果]

報告者はまず CNT 型 PTE カメラの全天球化実装に向けて、高曲率機械構造で長期間安定な素子動作を実現させるべく透湿加工という設計に着目することで、レーザ加工処理によってカメラ性能へ無依存な微細透湿孔を形成した。報告者は CNT 型 PTE カメラへの高透湿加工に際し、デバイスの大部分を占めるポリウレタン（PU）薄膜支持基板シートへと着目した。透湿度の単位としては $\text{kg/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ という単位が用いられており、人肌を一例に高曲率機械構造での長期安定な動作に向けては $5 \text{ kg/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ という性能が求められている。PU 元来の透湿度には $2 \text{ kg/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ 弱程度で頭打ちとなっており、報告者は PU へのレーザ加工によって最小 $200 \mu\text{m}$ 径の透湿孔を設けることにより、目標水準である $5 \text{ kg/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ を超える透湿度へと改良した。またこれらの高透湿な設計においては CNT 型 PTE カメラシート全域の 0.19% のみのレーザ加工により卓越した透湿度が得られており、デバイス元来の超広帯域・超高感度 MMW-IR 光計測性能を害することなく 3D 全天球視野モジュール実装に向けたハードウェア設計基盤へ展開されている（図 2・3）。

報告者は CNT 型 PTE センサを用いた MMW・THz・IR 計測における幾何学情報にも着目しており、特に情報工学分野において勢いを増すコンピュータビジョン（CV）へと展開した。CV は 2D 画像計測における光学的な情報（透

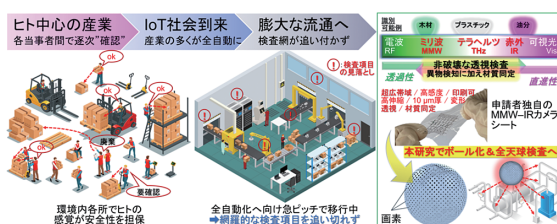


図 1 本研究のコンセプト

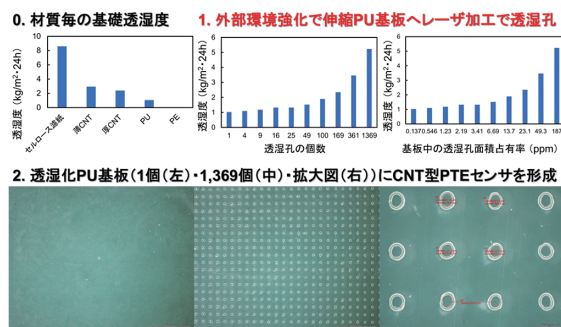


図2 CNT型PTEカメラシートの高透湿化設計

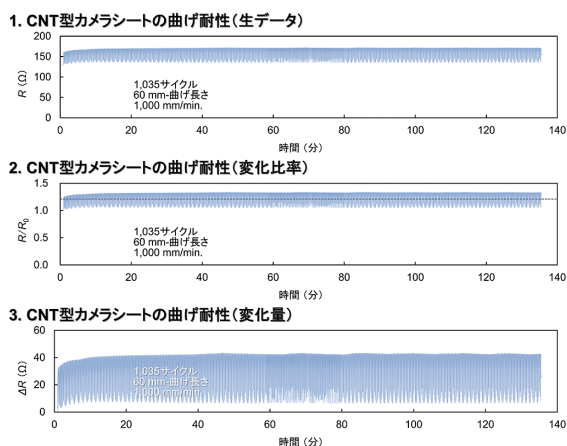


図3 CNT型PTEカメラシートの機械的柔軟性評価

過・吸収・反射・散乱の信号強度等)を時空間情報(座標変化, 位相のズレ, 時間遅れ等)と紐付けることにより, 観察物の 3D 構造を復元することが可能となる。従来の CV では侵襲的な X 線計測やデジタルアート技法としての可視光計測に重用されていた中, 報告者は CNT 型 PTE カメラが有する潜在能力から透視性・材質同定性に富む超広帯域かつ超高感度 MMW・THz・IR モニタリングへと拡張した。

具体的に報告者はCNT型PTEカメラを活用したTHz-IR帯域でのコンピュータドモグラフィ（CT）非破壊検査において、センサ画素を広視野な2D平面上へカメラ構造として集積することによって、先行研究（1Dアレイ画素計測）と比べて37%のシステム動作時間短縮を実証している。報告者が確立したエアジェットディスペンサ技術に基づいて、本成果はCNT型PTEカメラを1mmピッチ・20画

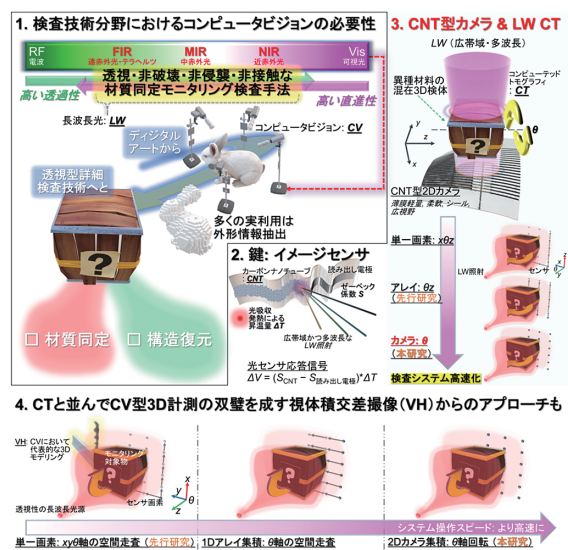


図4 CNT型PTEカメラによる基礎MMW-IR帯CV

素アレイ・5 mm ピッチの3アレイラインという2Dカメラ構造へ集積している。このデバイス基盤を活かすことによって、直線空間走査が不要な10 mm角超の広い視野範囲を976 nm-10.3 μ m 波長域におけるCT計測にもたらし、目視で不透明な遮蔽物により隠された複合検査対象（4種類の異種素材で構成）に対し、11分という高速システム動作、および9%未満の計測誤差という高い信頼性により、非破壊な材質同定・3D構造復元を実現した（図4）。

当初からの達成目標である材質同定・3D 構造復元ハイブリッドな非破壊検査計測実証として、報告者は不透明な遮蔽層内に設置された複合材質・複合形状モデルを観察対象物として扱い、広視野 2D 集積 CNT 型 PTE カメラで THz-IR 帯の透視 CT 計測を実施した。

デモンストラレーションにおいては 976 nm の短波長 IR, 1,310 nm の長波長 IR, また更に 10.3 μm 波長の THz を照射光として扱っており, 観察対象物の構成材質はこれら波長に対してそれぞれに異なる基礎光学特性 (透過率/吸光率) を示すとともに, CNT 型 PTE カメラは一貫して高感度 CT 計測を可能としている。得られた断層画像においては, 同一層内で異種材料が混在する状況 (図中の“最下層”: ガラス

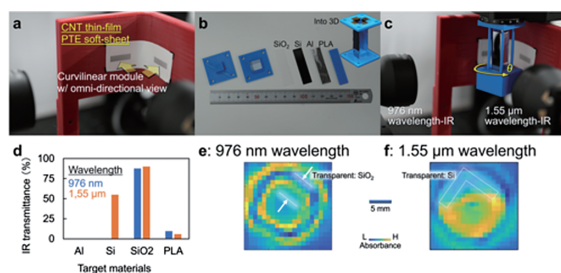


図8 マルチCT 非破壊検査の論文投稿準備状況

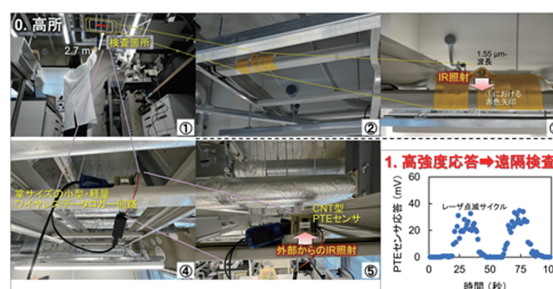


図10 難所遠隔制御デモンストレーション

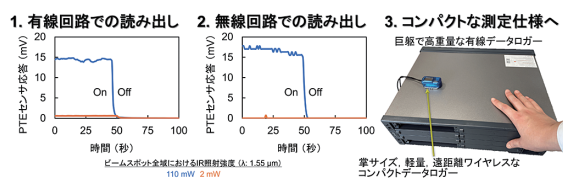


図9 CNT型PTEカメラによる無線回路動作

Siの透過率としてIR波長由来の材質同定が見込まれている。具体的には1.55 μm -IR照射にのみSiは高透明性を有しており、CNT型PTEカメラシート型の湾曲CTにおいてIR波長由来な非破壊透視断層復元像が適切に抽出されており、今後の全天球視野への実装が期待できる(図8)。なお本成果は、直近で原著論文へ投稿予定である。

本研究に基づき今後は更なる反射系・CT融合による網羅的ハイブリッドMMW-IR非破壊検査を推進していくと同時に、全天球実装に向けたハードウェア設計も重要な展望となる。報告者はこれまでに実験室内の計測を中心に行っており、今後は遠視野での基礎計測実証に向けてメートルスケールでのMMW-IR帯CV計測を実施していく。予備実験としては小型無線回路によるCNT型PTEセンサの遠隔制御を実証しており、2 m超の遠隔地から機械的・自動的に高精度なIR検出デモンストレーションに成功した(図9・10)。

総括として、本研究において報告者はCNT型PTEカメラシートに対する機械特性の多機能実証、MMW-IR帯域CVにおける計測精度および操作性の向上、また検査モジュールのリモートコントロール実証等に成功している。今

後は、CNT型PTEカメラシートへの風雨・砂塵・紫外線・大気温度変化という外部環境耐性高強度コーティング処理を施し、社会実装を目指す。最後に、この度の研究におけるご支援に際しまして、立石科学技術振興財団様に心より深く感謝を申し上げます。

[成果の発表、論文など]

【主な論文発表】

1. H. Hamashima, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), Structural stability-driven dynamic range analysis of carbon nanotube photo-thermoelectric sensors, *Advanced Sensor Research* **5**, 2, e00133 2026 (IF: 4, selected as Cover Feature).
2. M. Kubota, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), Simultaneous multi-layer stacking for longer-wavelength broadband computed tomography with a CNT film photo-thermoelectric camera sheet, *Advanced Sensor Research* **5**, 2, e00132 (IF: 4, selected as Front Cover).
3. Y. Kon, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), All-solution-processable robust carbon nanotube photo-thermoelectric devices for multi-modal inspection applications, *Materials* **18**, 21, 4980, 2025 (IF: 4).
4. M. Kubota, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), Operation speed tuning for infrared computer vision testing with pixel integration structures of carbon nanotube photo-thermoelectric imagers, *Optics Continuum*, **4**, 12, 2834–2844, 2025 (IF: 2).
5. M. Kubota, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), In-line multi-wavelength non-destructive pharma quality monitoring with ultrabroadband carbon nanotubes photo-thermoelectric imaging scanners, *Light: Science & Applications* **14**, 306, 2025 (IF: 24).
6. **K. Li*** (*責任著者), *et al.* A chemically enriched, repeatedly deformable, and self-recoverable broadband wireless imager sheet, *Communications Materials* **6**, 147, 2025 (IF: 10).
7. M. Yamamoto, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), Mechanically

alignable and all-dispenser printable device design platform for carbon nanotube-based soft-deformable photo-thermoelectric broadband imager sheets, *npj Flexible Electronics* **9**, 42, 2025 (IF: 15).

8. L. Takai, *et al.* **K. Li*** (*最終責任著者), n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets, *FlexMat* **2**, 115–125, 2025 (selected as Back cover).

[成果の発表, 論文など]

【専門書籍の分担執筆】

- 小坂充輝, 昆裕樹仁, 濱島隼人, 村上幸平, **李恒**, カーボンナノチューブ撮像アレイによる材質同定・構造復元型の透視トモグラフィ, 検査技術, 11月号(2025)
- 李恒**, カーボンナノチューブセンサによる非侵襲ミリ波-赤外トモグラフィー ~非金属材料が積層された不透明物体へ透視型の構造復元・材質同定情報を提供~, 電子情報通信学会誌, **108** 巻, 7号, ニュース解説, 687–688 (2025)
- 高井怜於, 久保田実樹, 金峻宇, 河野行雄, **李恒**, 選択的スクリーン塗工による高耐久なカーボンナノチューブ

光学透視センサの印刷実装, 炭素材料の研究開発動向 2025, 1章, 2節 (2025)

【招待講演】

- 李恒**, カーボンナノチューブを用いた非破壊検査技術, 蔵前技術士会・第213回 例会/講演会 (2026年2月, 東京).
- 李恒**, オンサイト非破壊検査の高信頼化に向けた全印刷による人工皮膚型の深部透視カメラの創出, 機械システム振興協会・先端共同プロジェクトセミナー (2025年11月, 東京).
- 李恒**, カーボンナノチューブの光熱起電力と長波長光による検査センサ応用, 日本物理学会・第80回 年次大会 (2025年9月, 広島).

【受賞】

- 2026年 田中貴金属記念財団 HIRAMEKI Award ※上位 **10%** 以内
- 2026年 第32回 小澤・吉川記念賞
※電気電子分野で年間 **3** 名選出
- 2026年 第29回 瀧野秀雄学術奨励賞
※産業技術への貢献で年間 **1** 名選出
- 2025年 第38回 安藤博記念学術奨励賞
※電気電子分野で最高位賞の一つ